

基于振动加速度与声音信号融合的轨道交通 列车轴箱轴承故障诊断方法*

郑则君 宋冬利 贾晨 马超

(西南交通大学轨道交通运载系统全国重点实验室, 610031, 成都)

摘要 [目的] 轴箱轴承是轨道交通列车转向架的关键零部件, 其健康状态直接影响列车的运行安全。需建立更为科学、高效的轴箱轴承故障诊断方法, 以有效提取强干扰噪声下的轴承故障特征信息。[方法] 以振动加速度及声音信号(以下简称“振声信号”)为研究目标, 分析了轴箱轴承振声信号的故障特征, 提出了一种最优带通卷积滤波的信号降噪方法。该方法将原始信号在频域内划分为多个分段, 确定不同分段的带通滤波参数, 构建了多通道带通卷积滤波器组。采用时域指标分段峭度来选择最优滤波信号, 并对最优滤波信号进行频率加权能量算子解调, 以识别轴承的故障部位。[结果及结论] 所提故障诊断方法可以在强干扰噪声下实现对振动加速度信号、声音信号故障特征的提取, 仿真结果及现场试验结果均验证了该诊断方法的有效性。振动加速度、声音信号的故障诊断结论可相互补充验证, 进一步提高轴箱轴承故障诊断的准确率。

关键词 轨道交通列车; 轴箱轴承; 故障诊断方法; 振动加速度信号; 声音信号; 带通滤波; 加权能量算子

中图分类号 U279.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.09.007

Fault Diagnosis Method for Rail Transit Train Axle Box Bearing Based on the Fusion of Vibration Acceleration and Acoustic Signal

ZHENG Zejun, SONG Dongli, JIA Chen, MA Chao
(State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China)

Abstract [Objective] Axle box bearing is a key component of rail transit train bogie, and its health state directly affects the train operation safety. Therefore, it is necessary to establish a more scientific and efficient fault diagnosis method for axle box bearing to effectively extract bearing fault characteristic information under strong noise interference. [Method] With the vibration acceleration and acoustic signal (abbreviated as vibration-acoustic signal) as the research object, the fault characteristics of the axle box bearing are analyzed, and an optimal sig-

nal noise reduction method with bandpass convolution filtering is proposed. In this method, the original signal is divided into several frequency bands in the frequency domain, different bandpass filtering parameters of each frequency band are determined and a multi-channel bandpass convolution filter bank is constructed. The optimal filtered signal is selected by using time-domain index segmental kurtosis, and demodulated by weighted frequency energy operator to identify the bearing fault spot. [Result & Conclusion] With the proposed method, the fault characteristics of the vibration-acoustic signal can be extracted under strong interference noise. Both the simulation and on-site test results verify the validity of the method. The fault diagnosis conclusions of the vibration-acoustic signal can be mutually verified, further improving the accuracy of the axle box bearing fault diagnosis.

Key words rail transit train; axle box bearing; fault diagnosis method; vibration acceleration signal; acoustic signal; bandpass filtering; weighted energy operator

轨道交通列车的轴箱轴承是联系转向架和轮对的装置^[1]。在长时间高速回转及大载重的耦合作用下^[2], 轴箱轴承易发生故障失效。轴箱轴承一旦失效, 将影响列车的运行安全。因此, 对轴箱轴承运行状态进行监测和分析, 是非常重要的工作^[3]。

目前轨道交通领域内对轴箱轴承的监测数据主要有声音信号、振动加速度信号及温度信号^[4]三类。不同类型的信号监测手段各有利弊, 对不同故障的敏感程度也有所差异。当轴承发生剥离、磨损等不同形式的损伤时, 轴承部件与损伤区域碰撞, 会产生周期性的冲击振动。与正常工况下的轴承振动有所不同, 此类冲击振动持续时间极短, 可以通过振动加速度及声音信号(以下简称“振声信号”)对此类冲击振动进行监测。因此, 本文结合振

* 国家重点研发计划项目(2019YFB1405401); 湖南创新省份建设专项项目(2021GK4014)

声信号 2 种不同的信息,对轴箱轴承进行故障诊断。通过对轴承的振声信号进行降噪解调与频谱分析,提取信号中的故障频率信息,分析其频率成分,进而确定轴承故障发生的部位。

1 振声信号故障特征分析

轴箱轴承多为滚动轴承。当轴承某处出现故障损伤时,其他部件在转动过程中经过损伤位置时会形成周期性的激励。这种冲击激励具有非常宽的频谱范围,可以激起轴承各部分的共振。轴承损伤出现在不同部位,会产生不同的冲击特征频率。通过滚动轴承的几何结构参数和转速信息,可计算轴承各部位的故障特征频率。

当外圈固定时,轴承外圈故障发生频率 f_{wq} 、轴承内圈故障发生频率 f_{nq} 的计算式^[5]分别为:

$$f_{wq} = \frac{rm}{120} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \quad (1)$$

$$f_{nq} = \frac{rm}{120} \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \quad (2)$$

式中:

r ——滚动轴承的转速,单位 r/min;

m ——轴承滚动体的数量,单位个;

d ——轴承滚动体直径,单位 mm;

D ——滚动轴承节圆直径,单位 mm;

α ——轴承滚动体接触角,单位($^{\circ}$)。

轴承滚动体故障发生频率 f_{gd} 的计算式为:

$$f_{gd} = \frac{rD}{120d} \left(1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \cos^2 \alpha \right) \quad (3)$$

滚动轴承保持架故障发生频率 f_{bcj} 的计算式为:

$$f_{bcj} = \frac{r}{120} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \quad (4)$$

将轴箱轴承尺寸参数代入式(1)~式(4)中,可计算得到轴承各部位不同转速下的故障发生频率。

2 振声信号故障特征提取方法

本文提出一种最优带通卷积滤波的信号降噪方法,通过提取振声信号故障特征信息并进行频谱分析,寻找频谱中的特征频率,进而确定轴承故障部位。

2.1 多通道卷积带通滤波器组

由于实际采集得到的信号中通常会伴有强烈的随机脉冲干扰,此时如采用快速谱峭度算法,在该算法选择的最优滤波频率范围内不一定包含所

期望的故障特征信息^[6],且所选择的最优滤波器很可能因为频率范围过窄而丢失部分信息。因此,需要选择合适的滤波通道,对信号进行滤波处理。

2.1.1 中心频率与带宽的选取

借鉴快速谱峭度算法中分解层数的选取方法,将原始信号按照式(5)进行频域内的分段处理:

$$k = \text{floor}(\lg N - 6) \quad (5)$$

式中:

k ——频域内分段总数;

N ——某离散信号的样本点数量;

$\text{floor}(\cdot)$ ——向下取整函数。

假设有 1 组离散数列,其样本点数为 18 000,数据采集频率为 12 000 Hz,则在 0 ~ 6 000 Hz 的频率范围内可将信号的频谱分成 8 段频带。取每段频带最大值处所对应的频率,将此频率作为该频段范围内选取的带通卷积滤波器的中心频率。为了覆盖整个频段,选取的带宽长度应为频率分段区间长度的 2 倍。不同滤波通道下各频率分段对应的频率幅值和滤波窗幅值如图 1 所示。

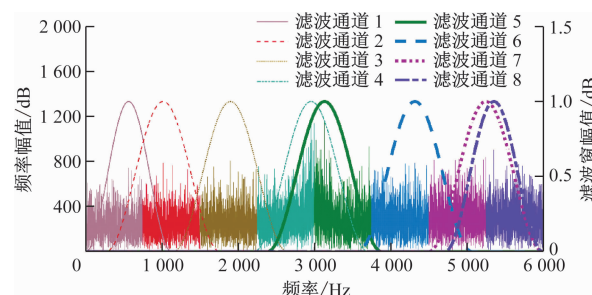


图 1 不同滤波通道下各频率分段对应的频率幅值和滤波窗幅值

Fig. 1 Frequency amplitude and filter window amplitude corresponding to each frequency segment under different filtering channels

2.1.2 滤波器系数求解

使用最小二乘估计法来计算滤波器系数,然后通过添加窗函数来平滑脉冲响应,本文选取的窗函数类型为汉明窗。汉明窗(又称为“改进的升余弦窗”)是余弦窗的一种,其频谱由 3 个矩形时窗频谱合成^[7]。汉明窗加权的系数能使旁瓣面积更小,可改善矩形窗频谱泄漏问题,并消除一定的高频干扰。

在确定中心频率、带宽及窗函数类型后,可计算不同滤波阶次的滤波器系数,并根据不同阶次对应的滤波信号峭度值来选取合适的滤波器阶数。

将计算所得的滤波器阶数与原始信号进行卷积运算,进而得到该带通卷积滤波器下的滤波信号。

将不同带通卷积滤波器按中心频率由小到大排序,组成离散信号的多通道卷积带通滤波器组。该滤波器组的数学表达式为:

$$\begin{cases} y_1(n) = x(n)b_1(n), & b_1(n) = F(f_{01}, f_{c1}, p_1, w_1) \\ \vdots & \vdots \\ y_i(n) = x(n)b_i(n), & b_i(n) = F(f_{0i}, f_{ci}, p_i, w_i) \\ \vdots & \vdots \\ y_k(n) = x(n)b_k(n), & b_k(n) = F(f_{0k}, f_{ck}, p_k, w_k) \end{cases} \quad (6)$$

式中:

i ——滤波频带分段次序, $i=1, 2, \dots, k$;

n ——采用滤波器系数求解的原始信号的样本点数量;

$y_i(n)$ ——原始信号在第 i 段频带下的滤波信号;

$x(n)$ ——原始信号;

$b_i(n)$ ——第 i 段频带下的滤波器系数;

$F(\cdot)$ ——滤波器系数函数;

f_{0i} ——第 i 段频带下的滤波器中心频率;

f_{ci} ——第 i 段频带下的滤波器带宽;

p_i ——第 i 段频带下的滤波器阶次;

w_i ——第 i 段频带下的滤波器窗函数。

2.2 频率加权能量算子解调法

包络解调法是故障诊断中常用的解调方法。该方法可以将高频载波中边频带的低频故障信号解调出来,实现故障特征频率的提取。希尔伯特包络解调法、能量算子解调法是 2 种典型的信号解调方法,可以从复杂含噪信号中增强数据隐藏的特征信息,实现数据的特征提取。但这 2 种方法均存在一定的局限性。在非整周期采样情况下,希尔伯特包络解调法会带来边缘飞翼^[8],在时间边缘处其数据的误差较大。能量算子解调法可能存在无意义的负值解调结果^[9]。

为了解决上述 2 种解调算法的局限性,文献[9]在能量算子解调法的基础上提出了一种新的解调方法——FWEO(频率加权能量算子)解调法。FWEO 法对信号进行求导运算,在计算信号瞬时能量的同时加入瞬时能量权重。信号瞬时能量的典型计算方法是对信号幅值进行平方运算或计算信号的包络。信号的瞬时能量权重由信号幅值决定,与频率取值无关。FWEO 法的计算式为:

$$\Lambda(t) = \left(\frac{dx_n(t)}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dH[x_n(t)]}{dt} \right)^2 \quad (7)$$

式中:

$\Lambda(t)$ —— t 时刻的频率加权能量算子;

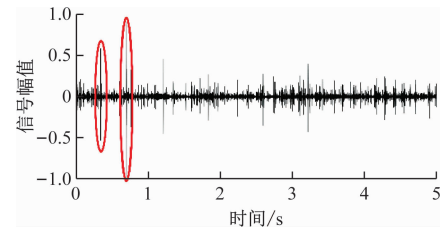
$x_n(t)$ —— t 时刻的原始信号;

$H(\cdot)$ ——希尔伯特变换函数。

从式(7)可知,求取一组信号的频率加权能量算子,可先计算其时域信号 1 阶导数的平方、希尔伯特包络 1 阶导数的平方,并将二者求和。

2.3 最优滤波信号确定

从多通道卷积带通滤波器组中选出最优滤波分量,并选用峭度作为特征指标。经量纲一化处理,滤波的部分信号在极小范围内会出现远高于信号整体分布范围的幅值(见图 2),进而导致信号峭度值异常增大,影响了最优滤波分量选择的准确率。



注:椭圆圈处为异常信号。

图 2 量纲一化的峭度值异常信号

Fig. 2 Signal with normalized abnormal kurtosis value

为了防止峭度值异常增大对信号选择造成的干扰,本文在峭度值的基础上,建立了一种改进的分段加权峭度指标 K_{ne} ,用以作为滤波信号的特征指标:

$$K_{ne} = \frac{K_{\min} \sum_{j=1}^z K_j}{z K_{\max}} \quad (8)$$

式中:

z ——信号在时域内的分段数量;

K_j ——第 j 段信号的峭度值, $j=1, 2, \dots, z$;

K_{\max} ——所有信号峭度值中的最大值;

K_{\min} ——所有信号峭度值中的最小值。

以图 2 的数据为例,计算可得 $K_{ne} = 9.8491$ 。由此可认为, K_{ne} 有效避免了因局部数值异常引起的整体峭度异常变大的情况,有效降低了少数异常值对信号整体的干扰。

计算每个滤波分量的特征指标,从中选取特征指标最大的滤波分量,将最大的滤波分量作为最优滤波信号 $y_{\text{best}}(n)$ 。对最优滤波信号进行频率加权

能量算子解调,并进行频谱分析,将频率幅值进行量纲一化处理,提取特征频率 f_i 。将 f_i 与轴承故障特征频率 f_q 比对,以确定轴承是否发生故障,以及轴承的故障部位。

2.4 振声信号故障诊断流程

基于振声信号的轴箱轴承故障诊断流程如图3所示。

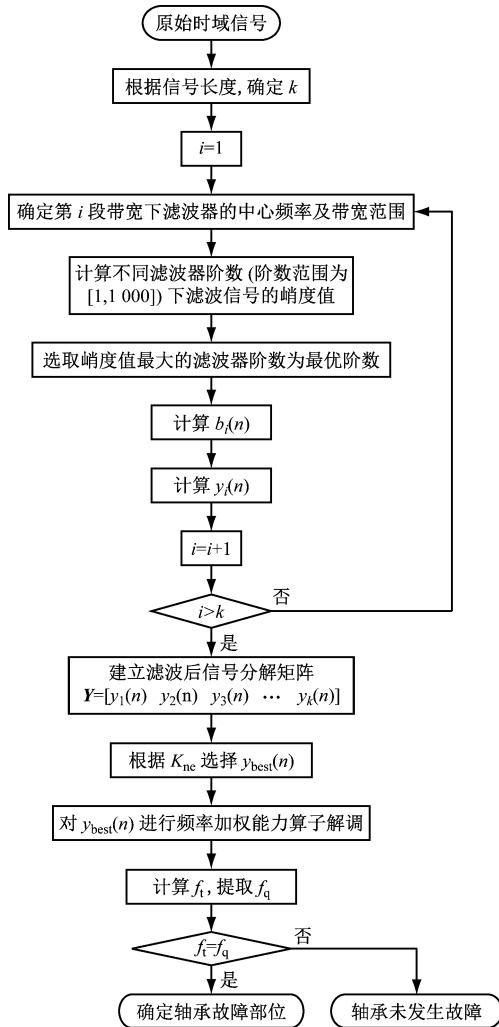


图3 基于振声信号的轴箱轴承故障诊断流程

Fig. 3 Fault diagnosis flow of the axle box bearing based on vibration-acoustic signal

3 仿真模型建立及参数设置

为验证上述故障诊断算法的有效性,本文进一步建立了故障轴箱轴承振动信号的数值仿真计算模型:

$$g(t) = s(t) + l(t) \quad (9)$$

式中:

$g(t)$ ——故障轴箱轴承振动仿真信号在 t 时刻的值;

$s(t)$ ——周期性冲击信号在 t 时刻的值;

$l(t)$ ——轴箱轴承运行环境所产生的复杂强噪声在 t 时刻的值。

理想情况下,滚动轴承发生故障时会产生一系列周期性冲击,此类冲击具有循环平稳特性。但由于滚动体在轴承内外滚道中的旋转速度并不总是相同,在承载区内滚动体的转速要快于非承载区内滚动体的转速,这导致故障冲击的周期性存在一定的偏差,此时轴承的故障信号是准循环平稳的。因此,在对 $s(t)$ 进行建模时,可引入随机变量,用以抵消信号的完全循环平稳特性。由于传感器在采集信号的过程中存在一定的信号衰减,因此还需要引入衰减函数来模拟信号采集过程中的衰减过程。最终建立的轴承故障冲击信号模型计算式^[6,10]为:

$$\begin{cases} s(t) = \sum_{\xi=1}^P A_{\xi} h_{\xi} \\ A_{\xi} = 1 + A_0 \sin(2\pi f_t t) \\ h_{\xi} = e^{-C(t-\xi T-\delta_{\xi})} \sin[2\pi f_{gz}(t-pT-\delta_{\xi})] \end{cases} \quad (10)$$

式中:

P ——轴承受到冲击的总次数;

A_{ξ} ——轴承第 ξ 次受冲击时产生的振动幅值;

h_{ξ} ——轴承第 ξ 次受冲击时产生的振动波形;

A_0 ——轴承振动幅值初值;

f_t ——轴承内圈旋转频率;

C ——冲击衰减系数;

T ——相邻冲击的时间间隔(即故障特征频率的倒数);

δ_{ξ} ——轴承第 ξ 次受冲击时内部各部件相互运动出现的时间误差,通常取值为 T 的1%~2%;

f_{gz} ——轴承系统的共振频率。

将 A_{ξ} 和 h_{ξ} 的表达式代入 $s(t)$ 中,整理可得到仿真信号表达式。

由于列车运行时环境复杂多变,为了模拟运行环境所产生的背景噪声,使得构建的模拟信号与实际信号更加接近,可采用高斯白噪声来充当 $l(t)$ 。

表1为轴箱轴承故障振动仿真信号的参数列表,将这些参数代入式(9)、式(10),即可得到轴箱轴承故障振动仿真信号。

仿真系统的采样频率为12 000 Hz,采样时间长度为1.5 s,得到的故障轴承仿真时域曲线如图4所示。

表 1 轴箱轴承故障振动仿真信号参数表

Tab.1 Vibration signal simulation parameters of the fault axle box bearing

仿真参数	参数值
P	435
A_0	0.85
f_t/Hz	40
C	600
f_{wq}/Hz	233
T/s	4.292×10^{-3}
δ_ξ/s	$(1\% \sim 2\%)T$
f_{gz}/Hz	3 000

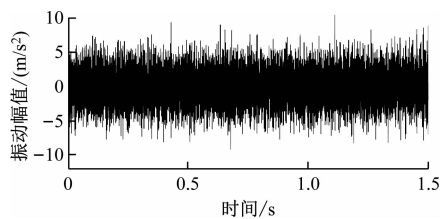


图 4 故障轴承仿真时域曲线

Fig. 4 Time domain diagram of fault bearing simulation signal

依据图 3 的故障诊断流程对该信号进行处理,并提取其特征频率 f_q 。该仿真数据共有 18 000 个样本点,根据式(5),可算得该频域内分段总数 $k=8$ (即信号分解为 8 段)。将各段的最优滤波器滤波信号量纲一化,可得到量纲一化后故障轴承仿真信号的多通道滤波信号时域图,如图 5 所示。

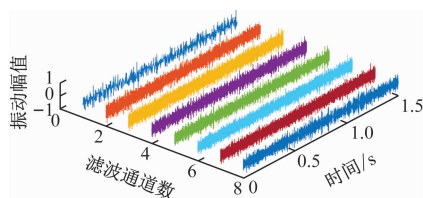
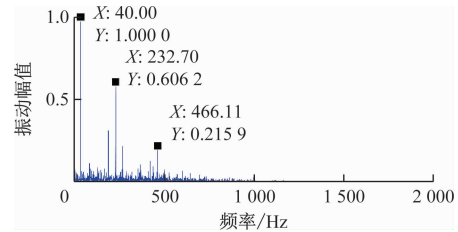


图 5 量纲一化后故障轴承仿真信号的多通道滤波信号时域图

Fig. 5 Time domain diagram of multi-channel filtering signal of fault bearing simulation signal after dimension normalization

此时各段滤波分量的 K_{ne} 分别为 2.338、2.799、2.788、3.028、3.033、2.729、2.728 及 2.335。从计算结果可知,第 5 段滤波分量的 K_{ne} 最大,因此选其作为最优滤波信号,对该段滤波信号进行加权能量算子解调,图 6 为量纲一化后故障轴承仿真的最优滤波信号加权能量算子谱。



注: X—该点的频率; Y—该点的加权算子能量谱幅值。

图 6 量纲一化后故障轴承仿真的最优滤波信号加权能量算子谱

Fig. 6 Optimal filtering signal FWEO (frequency weighted energy operator) spectrum for normalized simulation of the fault axle box bearing

图 6 中出现了转频(40.00 Hz)及 2 个特征频率(232.70 Hz、466.11 Hz),这 2 个特征频率与理论计算频率(233.00 Hz)、2 阶倍频(466.00 Hz)接近。相比直接对信号进行希尔伯特包络解调法处理,本文所提诊断方法可有效提取出信号的故障特征频率及其倍频,这表明本文所提诊断方法具有有效性。

4 试验验证分析

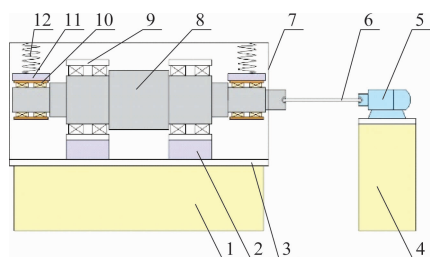
为进一步验证本文所提诊断方法的有效性,在西南交通大学轨道交通列车轴承试验台进行了接触式振动加速度信号及非接触式声音信号采集试验。试验台结构图及实物图如图 7^[8,11]所示。该试验台可以通过变频器调节三相异步电动机转速及外界激振值,也可以通过螺栓预紧力施加不同的垂向载荷,因此可满足多种工况下的轴承试验。

4.1 故障轴承振动加速度信号分析

振动加速度信号的试验采样频率为 25 600 Hz,共采集了 5 s 的试验数据。轴箱轴承的运行转速为 500 r/min,故障类型为外圈剥离。将轴承参数代入式(1),计算得到该轴承外圈故障时的特征理论频率为 61.50 Hz。图 8 为轴承外圈剥离故障下的振动加速度信号时域图。

对该信号进行频率分段,该信号共有 128 000 个样本点。根据式(5),可算得该信号可分解为 10 段。将各段的最优滤波器滤波信号量纲一化,可得到轴承外圈剥离故障下的振动加速度信号多通道信号滤波时域图,如图 9 所示。

此时各段滤波分量的 K_{ne} 分别为 3.887、6.497、6.285、6.745、6.438、5.912、4.628、3.533、6.083 及 6.002。从计算结果可知,第 4 个滤波分量的 K_{ne} 最



注:1—试验激振平台;2—支撑轴承的轴承座;3—轴承试验平台;4—电机支撑台;5—牵引电机;6—万向联轴器;7—轴承试验台支撑架;8—主轴;9—支撑轴承;10—被试轴承;11—被试轴承的轴承座;12—加载弹簧。

a) 结构图



b) 实物图

图7 轨道交通列车轴承试验台的结构图及实物图

Fig. 7 Structure drawing and picture of the test bench for rail transit train bearing

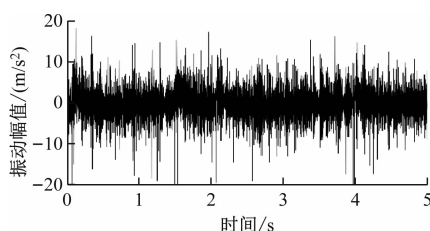


图8 轴承外圈剥离故障下的振动加速度信号时域图

Fig. 8 Time domain diagram of vibration acceleration signal under bearing outer ring stripping fault

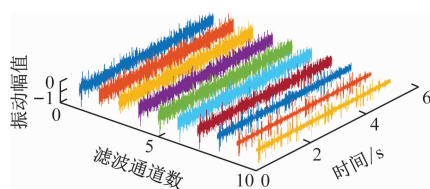


图9 量纲一化后轴承外圈剥离故障下的振动加速度信号多通道滤波信号时域图

Fig. 9 Time domain diagram of multi-channel filtering signal of vibration acceleration signal under bearing outer ring stripping fault after dimension normalization

大,因此选其作为最优滤波信号,并对该信号进行加权能量算子解调。图10为量纲一化后轴承外圈剥离故障下的振动加速度信号最优滤波信号加权能量算子谱。

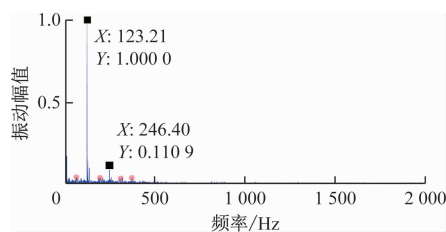


图10 量纲一化后轴承外圈剥离故障下的振动加速度信号最优滤波信号加权能量算子谱

Fig. 10 Optimal filtering signal FWEQ spectrum of normalized vibration acceleration signal under bearing outer ring stripping fault

由图10可看出:原始信号通过本文所提诊断算法流程处理后,在123.21 Hz及246.40 Hz处有明显的频谱尖峰,在61.58 Hz及其3阶、5阶、6阶倍频处也有较为明显的频谱尖峰。提取到的特征频率与理论计算频率之间的误差仅为0.13%,由此可认为该诊断方法具有有效性。

4.2 故障轴承声音信号分析

在同一工况下同步采集了声音信号,采用相同的处理流程,声音信号的采样频率为48 000 Hz,得到轴承外圈剥离故障下声音信号时域图如图11所示。

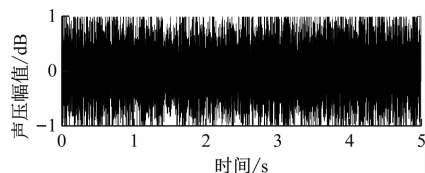


图11 轴承外圈剥离故障下的声音信号时域图

Fig. 11 Time domain diagram of acoustic signal under bearing outer ring stripping fault

对该信号按本文所提故障诊断流程进行特征频率提取。该声音信号共有242 400个样本点,根据式(5),可算得该信号可分解为11段。将各段的最优滤波器滤波信号量纲一化,可得到量纲一化后轴承外圈剥离故障下的声音信号多通道滤波信号时域图,如图12所示。

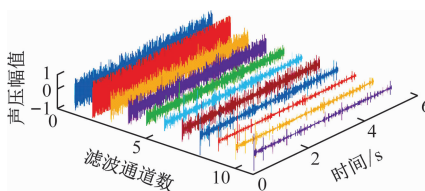


图12 量纲一化后轴承外圈剥离故障下的声音信号多通道滤波信号时域图

Fig. 12 Time domain diagram of multi-channel filtering signal of acoustic signal under bearing outer ring stripping fault after dimension normalization

此时各滤波分量的 K_{ne} 分别为 2.130、2.278、4.439、5.300、3.820、3.849、10.180、5.310、4.931、9.849 及 10.090。从计算结果可知,第 7 段滤波分量的 K_{ne} 最大,因此选其作为最优滤波信号,对该信号进行加权能量算子解调。图 13 为量纲一化后轴承外圈剥离故障下的声音信号最优滤波信号加权能量算子谱。

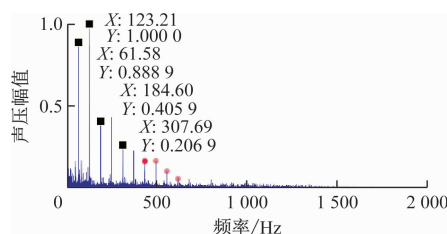


图 13 量纲一化后轴承外圈剥离故障下的声音信号最优滤波信号加权能量算子谱

Fig. 13 Optimal filtering signal FWEQ spectrum of normalized acoustic signal under bearing outer ring stripping fault

由图 13 可看出:原始信号通过本文所提诊断方法流程处理后,在 61.58 Hz、123.21 Hz、184.60 Hz、246.10 Hz、307.69 Hz 及 61.58 Hz 的 6 阶—11 阶倍频处均出现了频率尖峰,且特征频率(61.58 Hz)与理论计算频率(61.50 Hz)间的误差极小。本文所提诊断方法可有效提取出信号中隐藏的故障特征频率及其倍频,试验结果充分说明了本文所提方法的有效性。

5 结语

在存在大量干扰信号的情况下,从信号中提取特征频率较为困难。本文使用最优带通卷积滤波对信号进行分解降噪,以提高信噪比,然后通过使用频率加权能量算子解调法对信号进行解调分析,以有效提取信号的特征频率及倍频。仿真结果及现场试验结果均验证了本文所提方法的有效性。

此外,通过对同一时刻采集到的轴箱轴承振动加速度信号、声音信号进行分析后发现,这 2 种不同类型信号均可实现对轴承的状态监测。本文所提方法通过提取轴承的特征频率,实现了对故障轴承的有效定位。融合了振动加速度信号数据和声音信号数据的诊断结果,可实现对诊断结论的相互补充验证,进一步提高轴箱轴承故障诊断的准确率。

参考文献

[1] 李永健. 高速列车轴箱轴承智能故障诊断技术研究[D]. 成

都: 西南交通大学, 2017.

LI Yongjian. Research on intelligent fault diagnosis technique of axle box bearing of high speed train [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.

[2] 耿自林, 宋冬利, 张卫华, 等. 高速列车轴箱轴承动力学行为及温度分析[J]. 机械, 2020, 47(11): 54.

GENG Zilin, SONG Dongli, ZHANG Weihua, et al. Dynamic and temperature analysis of axle box bearing of high-speed train [J]. Machinery, 2020, 47(11): 54.

[3] 彭飞, 张尧. 轨道交通轴承故障诊断与寿命预测技术综述[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(12): 162.

PENG Fei, ZHANG Yao. General review of rail transit bearing fault diagnosis and lifespan prediction technology [J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(12): 162.

[4] 刘冠男, 常振臣, 高明亮, 等. 基于长短期记忆网络的动车组轴箱轴承故障诊断预测模型研究[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(2): 86.

LIU Guannan, CHANG Zhenchen, GAO Mingliang, et al. Fault diagnosis model for EMU bogie bearing based on LSTM [J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(2): 86.

[5] 郑则君. 高速列车轴箱轴承声音特征分析与故障诊断方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.

ZHENG Zejun. Research on sound characteristics and fault diagnosis method of axle box bearing of high-speed train [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.

[6] 陈丙炎, 张卫华, 宋冬利, 等. 最优解调频带识别及其在滚动轴承故障诊断中的应用[J]. 机电传动, 2019(5): 137.

CHEN Bingyan, ZHANG Weihua, SONG Dongli, et al. Identification of optimal demodulation frequency band and its application in fault diagnosis of rolling element bearings [J]. Electric Drive for Locomotives, 2019(5): 137.

[7] 张俊敏, 刘宗方, 陈勉. 一种基于 Hamming 自乘法窗函数和四插值的谐波分析方法[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2016, 35(1): 132.

ZHANG Junmin, LIU Zongfang, CHEN Mian. A harmonic analysis method based on Hamming self-multiplication window functions and four-spectrum-line-interpolation [J]. Journal of South-Central University for Nationalities (Natural Science Edition), 2016, 35(1): 132.

[8] ZHENG Z, SONG D, XU X, et al. A fault diagnosis method of bogie axle box bearing based on spectrum whitening demodulation [J]. Sensors, 2020, 20(24): 7155.

[9] 刘泽潮, 林建辉, 丁建明, 等. 变步长频率加权能量算子在轴承故障诊断中的应用[J]. 振动与冲击, 2019, 38(7): 86.

LIU Zechao, LIN Jianhui, DING Jianming, et al. Application of variable step frequency weighted energy operator in bearing fault diagnosis [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(7): 86.

[10] 张海峰, 陈丙炎, 宋冬利. 基于改进峭度图法的滚动轴承故障诊断[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(2): 41.

ZHANG Haifeng, CHEN Bingyan, SONG Dongli. Bogie bearing fault diagnosis based on improved kurtogram [J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(2): 41.

(下转第 52 页)

故障区段的准确辨识。在此基础上,构建了故障分段导向安全的断路器控制方案,以保障非故障区段的正常运行,缩小事故停电范围。软件仿真结果验证了本文所提故障辨识方法及断路器控制方案的正确性。

本文提出的贯通供电方式牵引网分段供电方案、故障区段辨识方法及最小停电区间断路器控制方案,可进一步推广到粤港澳大湾区城际铁路(交流制线路)中,以提升粤港澳大湾区城际铁路供电系统的可持续性与可靠性。

参考文献

- [1] 李群湛. 论新一代牵引供电系统及其关键技术[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(4): 559.
- LI Qunzhan. On new generation traction power supply system and its key technologies for electrification railway[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(4): 559.
- [2] 李群湛. 城市轨道交通交流牵引供电系统及其关键技术[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(2): 199.
- LI Qunzhan. Industrial frequency single-phase AC traction power supply system and its key technologies for urban rail transit[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(2): 199.
- [3] 崔杰圣. 贯通同相供电系统运行方式研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- CUI Jiesheng. The research on operation modes of cophase continuous traction power supply system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [4] 李兴旺. 贯通式同相牵引供电系统建模及牵引网故障区间定位研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015.
- LI Xingwang. Study on modeling of through-type in-phase traction power supply system and fault location of traction network[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2015.
- [5] 黄钰淇. 贯通式同相牵引供电系统故障识别研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
- HUANG Yuqi. Research on fault identification of through-type in-phase traction power supply system[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017.
- [6] WANG S, CHEN M, LI Q, et al. A new hybrid fault identification method based on multiterminals synchronous measure information for all parallel at traction power supply system[J]. Energies, 2018, 11(10): 2698.
- [7] SERRANO J, PLATERO C, LÓPEZ-TOLEDO M, et al. A novel ground fault identification method for 2×5 kV railway power supply systems[J]. Energies, 2015, 8(7): 7020.
- [8] CHO G J, KIM C H, KIM M S, et al. A novel fault-location algorithm for AC parallel autotransformer feeding system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(2): 475.
- [9] 陈海涛, 熊列彬, 王昌. 纵向分段式全并联 AT 牵引网保护配置[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(12): 47.
- CHEN Haitao, XIONG Liebin, WANG Chang. Protection configuration of longitudinal segmented all parallel AT traction network[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2015, 27(12): 47.
- [10] 王旭光, 李群湛, 陈民武, 等. 高速铁路全并联 AT 牵引网状态测控方案与仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 128.
- WANG Xuguang, LI Qunzhan, CHEN Minwu, et al. A scheme of state measure and control of all-parallel AT traction network for high-speed railway and simulation analysis[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 128.
- [11] 黄华学. 组合式同相供电继电保护方案研究[J]. 电气化铁道, 2014, 25(5): 17.
- HUANG Huaxue. Study on scheme for combined type co-phase power supply relay protection[J]. Electric Railway, 2014, 25(5): 17.
- [12] CHEN M W, LI Q Z, ROBERTS C, et al. Modelling and performance analysis of advanced combined co-phase traction power supply system in electrified railway[J]. IET Generation Transmission and Distribution, 2016(10): 906.
- [13] 崔召华. 高速铁路牵引网分段测控系统研究与试验分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- CUI Zhaohua. Research and test analysis of high speed railway traction network segmented measurement and control system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [14] 刘淑萍. 高速铁路牵引供电系统继电保护研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- LIU Shuping. Study on protective relay of traction power supply systems for high speed railways[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- 收稿日期:2022-05-15 修回日期:2022-06-20 出版日期:2024-09-10
Received:2022-05-15 Revised:2022-06-20 Published:2024-09-10
- 通信作者:侯峰,高级工程师,houfeng6686@163.com
- ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license
- 收稿日期:2022-04-29 修回日期:2022-08-30 出版日期:2024-09-10
Received:2022-04-29 Revised:2022-08-30 Published:2024-09-10
- 第一作者:郑则君,博士研究生,zhengjuner@163.com
- 通信作者:宋冬利,高级实验师,sdlcds@swjtu.edu.cn
- ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 46 页)

- [11] 李杨. 基于振动环境下的高速列车轴箱轴承试验台设计与研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- LI Yang. Design and research on the test rig for axle box bearings in high-speed train based on the vibration environment[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.